

## Измерения пирозлектрических коэффициентов сегнетоэлектриков на основе твёрдых растворов титанатов бария-стронция

А.П. Буровихин<sup>1</sup>, И.Л. Мыльников<sup>1</sup>, М.А. Мишнёв<sup>1</sup>, А.С. Анохин<sup>2</sup>, А.А. Семёнов<sup>1</sup>,  
А.И. Дедык<sup>1</sup>, П.Ю. Белявский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 197376  
Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: antonburovihin@mail.ru

<sup>2</sup>Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Россия

Определение пирозлектрических коэффициентов  $p$  сегнетоэлектриков (СЭ) играет ключевую роль при разработке твердотельных охлаждающих устройств нового типа, использующих электрокалорический (ЭКЭ) и мультикалорический эффекты [1-3]. Охлаждающие устройства на ЭКЭ представляют собой экологически безопасную альтернативу охлаждению, заменяющему широко распространенное в настоящее время охлаждение на основе сжатия пара. Величина электрокалорического изменения температуры  $\Delta T$  прямо пропорциональна пирозлектрическим коэффициентам СЭ материалов  $\Delta T = p (T \cdot E / C)$ , где  $T$  – абсолютная температура,  $E$  – напряжённость электрического поля,  $C$  – теплоёмкость материала [4]. Значения пирозлектрических коэффициентов для одного и того же материала могут различаться на порядки в зависимости от внешних воздействий во время измерений [5].

Цель настоящей работы – разработка метода измерения пироккоэффициентов керамических сегнетоэлектриков в условиях, приближенных к применяемым в электрокалорических преобразователях.

Измерения пирозлектрических коэффициентов проводилось по экспериментальным значениям пирозлектрических откликов напряжения  $U(t, T)$ , возникающих при модуляции температуры  $dT/dt$  с помощью импульсов лазерного излучения. Для измерения пирозлектрического отклика напряжения  $U(t, T)$  был создан макет установки [6], в котором модуляция температуры (скорость изменения температуры  $dT/dt$ , относительно начальной температуры образца) осуществлялась с помощью импульсов лазерного излучения с длиной волны 470 нм, максимальной мощностью 1 Вт и частотой 0,1-0,5 Гц.

Обычно пироккоэффициент вычисляют как производную поляризации  $P$  по абсолютной температуре  $T$  [4, 5]. Тогда можно показать, что в предложенной схеме измерений при равномерном распределении заряда по площади  $S$  плоскопараллельного образца, пироккоэффициент можно рассчитать, зная только производную пирозлектрического отклика напряжения по температуре:

$$p = \frac{\partial q}{S \cdot \partial t} \frac{\partial t}{\partial T} = \frac{C_0 \cdot \partial U}{S \cdot \partial t} \frac{\partial t}{\partial T} = \frac{C_0}{S} \frac{\partial U}{\partial T},$$

где  $q$  – заряд на обкладках исследуемого и эталонного ( $C_0$ ) конденсаторов при их последовательном соединении [6]. Температура исследуемого образца в точке нагрева измерялась с помощью приёмника теплового излучения (тепловизор Testo 885) с точностью до 0,1°C и так же, как и напряжение  $U(t, T)$ , измеренное мультиметром (Keysight 34461A), передавалось на персональный компьютер с целью синхронизации и последующей обработки.

Для экспериментальных измерений использовались плоскопараллельные керамические образцы титаната бария (ВТО) и твёрдого раствора титанатов бария – стронция (BSTO), полученные по стандартной керамической технологии. Контроль качества изготовленных образцов проводился с помощью РДА, по температурным измерениям ёмкости (измеритель LCR Agilent E4980A) и по измерениям относительной плотности керамики, которая находилась в пределах 84-94 %. Толщины конденсаторных структур составляли: 1,3–0,5 мм. Медные электроды толщиной ~ 1 мкм закрывали всю поверхность керамических пластин диаметром 6-10 мм.

Экспериментальные результаты измерения пироккоэффициентов образца ВТО, измеренные с помощью предложенной методики (кривые 1 и 2) и по температурно-полевым измерениям петель гистерезиса (кривая 3) представлены на Рисунке 1.

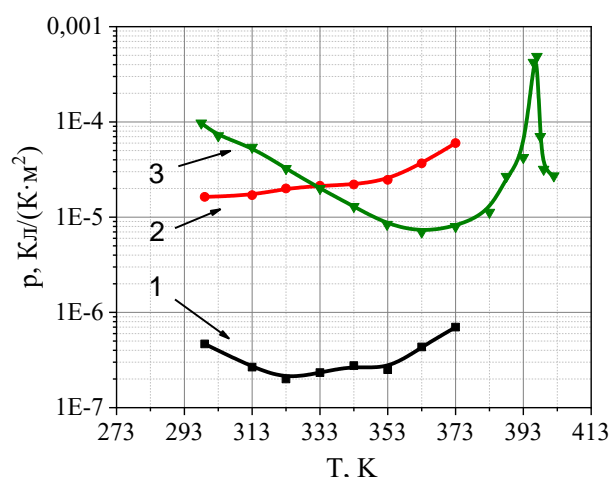


Рисунок 1. Температурные зависимости пироккоэффициентов ВТО: 1 – при  $U_{см} = 0$  В; 2 –  $U_{см} = 50$  В; 3 –  $U_{см} = 50$  В (по температурно-полевым зависимостям  $P(E)$ ).

Графики были представлены в полулогарифмическом масштабе, чтобы показать возможность измерения пироккоэффициентов в отсутствии напряжения смещения ( $U_{см}$ ) по предложенной методике (кривая 1) в отличие от метода петель гистерезиса  $P(E)$ . С увеличением напряжения смещения температурные зависимости пироккоэффициентов смещались вверх в результате роста поляризации. При  $U_{см} = 50$  В в диапазоне температур ниже фазового перехода характер зависимостей  $p(T)$ , полученных разными методами отличался в пределах одного порядка.

Создан динамический метод, позволяющий измерять пирозлектрические коэффициенты по пирооткликам напряжения  $U(t, T)$  без прямых измерений пирозлектрического тока. Достоинством метода является то, что он позволяет измерять пироккоэффициенты, обусловленные только спонтанной поляризацией для образцов в сегнетофазе. Для образцов, находящихся в параэлектрической фазе, метод является средством считывания состояния начальной поляризации.

Отличием предложенной методики от других динамических и статических [5] методов измерения пироккоэффициентов является большая скорость нагревания образцов, которая соответствует условиям работы твердотельных охладителей на электрокалорическом эффекте.

Работа поддерживалась грантом РНФ № 19-79-10074 в Санкт-Петербургском Государственном Электротехническом Университете.

1. Y. How, J. Li, J. Ding, T. Ye, R. Liang, *Journal of Applied Physics* **127**, 064103 (2020).
2. S. Karmanenko, A. Semenov, A. Dedyk, A. Es'kov, A. Ivanov, P. Beliavskiy, Yu. Pavlova, A. Nikitin, I. Starkov, A. Starkov, O. Pakhomov, *Electrocaloric Materials* (Springer), 183-223 (2014).
3. X. Moya, M.H. Phan, H. Srikanth, F. Albertini, *J. Appl. Phys.* **128**, 240401 (2020).
4. Б.А. Струков, *Соросовский образовательный журнал* **5**, 96 (1998).
5. S. Jachalke, E. Mehner, H. Stoecker, J. Hanzig, M. Sonntag, T. Weigel, T. Leisegang, D.C. Meyer, *Appl. Phys. Rev.* **4**, 021303 (2017).
6. I.L. Mylnikov, A.A. Semenov, A.I. Dedyk, O.V. Pakhomov, P.Yu. Belyavskiy, A.P. Burovikhin, Yu.V. Pavlova, A.B. Ustinov, *J. Phys.: Conf. Ser.* **4**, 077006 (2019).